



リユースに着目した使用済自動車由来の金属資源の動的循環解析

著者	張 政陽
号	64
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	環博第137号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00129717

氏名	ちょう せいよう
授与学位	張 政陽
学位記番号	博士（環境科学）
学位授与年月日	環博第137号
学位授与の根拠法規	令和2年3月25日
研究科、専攻の名称	学位規則第4条第1項
学位論文題目	東北大学大学院環境科学研究科（博士課程）環境科学専攻
指導教員	リユースに着目した使用済自動車由来の金属資源の動的循環解析
論文審査委員	東北大学教授 松八重 一代
	主査 東北大学教授 松八重 一代 東北大学教授 中谷 友樹
	東北大学准教授 グレゴリー トレンチャー 東北大学教授 劉 庭秀
	(国際文化研究科)

論文内容要旨

近年、地球環境や天然資源の制約は益々厳しさが増えつつあり、経済・社会の持続可能性に関する世界的危機意識が高まっている。使用済み製品の循環利用が持続可能な社会の構築において重要なことは明らかである。一方、現実には、製品の劣化や機能価値の陳腐化のため、一旦材料に戻して再生産することが長く行われてきた。しかしながら、熱力学的制約や技術、経済合理性など様々な制限のもとで、素材リサイクルでは物質、製品機能及び残存価値の散逸が不可避であるため、低効率・低価値での資源循環にしかない。対して、使用済み製品に含まれる物質や機能、残存価値の回収の最大化を目指してリユース、リマニュファクチャリング、リペア、リファービッシュなどの手段が提唱され、エアロスペース、自動車、機械設備など様々な分野で応用されている。このように、多少の手間や材料の追加投入で製品の機能や経済価値を回復しても、それが地域の資源循環構造にどのような経時的変化をもたらすか、社会全体に対しても十分に有益かどうか、どれだけの便益があるかを検証することは、循環型社会への転換に向けた政策決定に科学的な根拠を提供する上で重要である。

本研究は、リユース及びリマニュファクチャリングに着目し、動的なマテリアルフロー分析モデルである MaTrace モデルを用いて、使用済みエンジンの循環利用による製品ライフサイクルの時間的遷移を通じて、日本経済における資源循環構造の変化を解明するとともに、リユース及びリマニュファクチャリングがもたらす物質損失、製品や素材の機能、残存価値の損失が回避される効果を定量的に評価したものである。本稿は全7章から構成され、主な内容は以下の通りである。

第1章では、限りある金属資源を今後とも有効に使っていくための素材リサイクルの現状を整理

し、素材リサイクルにおける物質、製品や素材の機能及び残存価値の損失といった課題を抽出する。また、その課題解決のための手段を説明しつつ、リユースまたはリマニュファクチャリングに着目する必要性を明確化する。その上で、本研究の目的を示す。

第2章では、多くの国や地域では、使用済み自動車リサイクルが進んでいることが、自動車由来の鉄スクラップに随伴する合金元素の散逸問題を述べる。また、自動車の構成材料やレアメタルの使用状況を整理しつつ、エンジンに含まれる鋼材ならびに合金元素である Ni と Cr に着目する理由を説明する。さらに、分析対象物と手法に関して、既存研究や明らかにされた成果、存在している問題点を明確にした上で、本研究の位置づけを示す。

第3章では、リユースとリマニュファクチャリングの定義を明確に定めた後、アメリカやヨーロッパ、日本、中国、マレーシアにおける産業別リユースとリマニュファクチャリングの動向、また、その推進の社会的意義と障壁を述べる。同時に、その社会的効果を評価するためのモデル構築の必要性を示す。

第4章では、動的なマテリアルフロー分析モデルである **MaTrace** モデルの概要を紹介した上で、リユース・リマニュファクチャリングの導入効果を明示的に分析可能な **MaTrace** モデルの拡張を行う。拡張に際して、モデルのデータベースやパラメータを詳しく記述し、定式化も行う。また、拡張モデルから導出される結果を基に、物質や製品機能、残存価値の損失回避効果を計測するための指標を定める。さらに、エンジンの事例研究を実施するためのシナリオ作成とデータ整備を行う。

第5章では、第4章で構築したモデルをエンジンに適用して分析を行う。4つの想定シナリオ、即ち、素材リサイクルのみの資源循環シナリオ、なりゆきシナリオ、リユースが進んだ資源循環シナリオとリマニュファクチャリングが進んだ資源循環シナリオにおいて、物質、製品・素材機能と残存価値の損失回避効果の評価結果を明示、解釈する。

第6章では、まず、感度分析と適用してデータの不確実性が4つのシナリオ結果にそれぞれ与える影響を考察する。次に、拡張モデルの適用範囲や強み、限界を検証するとともに、限界の解消方法も提示する。上記の分析結果を踏まえ、資源循環政策の在り方を見直す必要性、また、リユース・リマニュファクチャリングの普及効果への期待、更にはその推進に向けて政策的示唆を説明する。

第7章は、各章で得られた成果及び本研究の独自性を取りまとめ、今後の展望を見据える。

論文審査結果の要旨及びその担当者

論文提出者氏名	張 政陽
論 文 題 目	リユースに着目した使用済自動車由来の金属資源の動的循環解析
論文審査担当者	主査 <u>教授 松八重一代</u> <u>教授 中谷 友樹 准教授 グレゴリー トレンチャー</u> <u>教授 劉庭秀 (国際文化研究科)</u>

論文審査結果の要旨

張政陽氏は、リユース及びリマニュファクチャリングに着目し、動的なマテリアルフロー分析モデルである MaTrace モデルを用いて、使用済みエンジンの循環利用による製品ライフサイクルの時間的遷移を通じて、日本経済における資源循環構造の変化を解明するとともに、リユース及びリマニュファクチャリングがもたらす物質損失、製品や素材の機能、残存価値の損失が回避される効果を定量的に評価するモデルの提案ならびに解析を行った。拡張したモデルに基づき、素材リサイクル、リユース、リマニュファクチャリングの各段階が将来的に進んだ資源循環シナリオにおいて、特に鉄、ニッケル、クロムに着目して物質、製品・素材機能と残存価値の損失回避効果の評価を行った。

解析の結果、使用済みエンジンを全量素材リサイクルからその一部をリユース・リマニュファクチャリングに置き換えることで、50 年後に、初年度にエンジン生産に投入された鋼材ならびに合金元素の Ni と Cr の物理的な損失がそれぞれ 3%、1~2%、3~5%回避され、これら物質のエンジンに留まる年数が 18 年から最長 47 年まで延長されるため、土木建築物へのダウングレードリサイクルが抑えられることを示した。また、50 年後のエンジン、Ni と Cr の機能的損失がそれぞれ 6~11%、3~7%、5~12%程度削減できる点を定量的な結果に基づき示している。加えて、エンジンの残存価値が元製品の 10%以下までに低下するのにかかる年数は、16 年から最大 29 年まで伸びる可能性も確認している。さらに、素材リサイクルだけの資源循環構造に比べ、リユースやリマニュファクチャリングが進んだ循環構造が使用済製品に含まれる物質、製品や素材機能、残存価値の損失回避に有効であること、リマニュファクチャリングがリユースより優れた効果を持つことを明らかにした。

拡張 MaTrace モデルは、使用済み製品の再資源化において外生的変化が起きた際に、マクロレベルでの地域内の資源循環構造への影響を動的に推定するために用いられる。本モデルを使うことで、使用済みエンジンに含まれる鋼材とそれに随伴するニッケルとクロムといった 3 つの物質が経時的な変化を伴う異なる製品にどのように分布し、どのような経路を通じてどれだけ散逸するかを捉えること、リユース、リマニュファクチャリング、素材リサイクルネットワークの複雑さを反映することもできる。また、本モデルから導き出された計測指標を用いて、物質、製品や素材機能、残存価値の損失回避効果の定量評価も実施できる点は学術的にもリサイクル政策の制度設計においても重要な貢献である。

本研究は、リユース・リマニュファクチャリングの導入効果の検証に一定の貢献を果たすことができる拡張性や応用性を持っており、今後の資源循環政策を物質循環から機能価値・経済価値の循環へ移行させる上で、一定の指標として有用性を持たせることが可能である。一方、データの不確実性やモデル限界への対処方法も提示されているため、他者が同じ手順で同じ結果が再現可能であり、この対処方法に基づいて修正を加えれば、“自動車用内燃機関・同部分品” 以外の製品や他地域への応用も可能であり、おおいに将来の発展性をもっている。

張政陽氏は、これらの研究成果を国際ジャーナルに 1 本出版しているとともに、2 本の論文を現在、投稿準備中である。国内・国際会議等での発表・成果発信を十分に行っており、その成果は高く評価されている。

よって、本論文は博士(環境科学)の学位論文として合格と認める。